بهبود زمان تکمیل فرایند طراحی بالگرد ترابری با استفاده از روش مبتنی بر ماتریس تبدیل کار

محمد حاجی‌جعفری[۱]، امیررضا کوثری[۲]، مهدی فکور ثقیه[۳]

۱ دانشجوی دکتری، گروه هوافضا، دانشکدهٔ علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

۲ دانشیار، گروه هوافضا، دانشکدهٔ علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، kosari_a@ut.ac.ir

۳ دانشیار، گروه هوافضا، دانشکدهٔ علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۳۰

چکیده

توسعهٔ محصولات هوافضایی در کوتاه‌ترین زمان ممکن، از مهم‌ترین پارامترهای رقابتی در بازار به‌شمار می‌آید. این در حالی است که پیچیدگی ذاتی این محصولات سبب ایجاد چرخه‌های گستردهٔ اطلاعاتی می‌شود که زمان تکمیل فرایند طراحی را به‌شکل چشم‌گیری افزایش می‌دهد. این واقعیت کاستن از زمان تکمیل در کنار حفظ کیفیت را به ضرورتی انکارناپذیر مبدل می‌کند. در این مقاله از طرح اجرایی با ریسک کمینه برای به‌سازی فرایند مفهومی طراحی بالگرد ترابری ای. اچ. ۱۰۱، به عنوان مورد مطالعاتی، استفاده شده که برای مدیریت تکرارها و کاهش زمان تکمیل بر چارچوب ماتریس تبدیل کار استوار است. این طرح یک سیاست کاری را مطرح می‌کند که در آن وظایف طراحی با بیشترین سطح همگیری در گام‌های نخست طراحی مورد توجه قرار گرفته و با پیشرفت طراحی، دیگر وظایف به‌صورت تدریجی مورد توجه قرار می‌گیرند. جانمایهٔ این طرح، چیدمان مؤثر وظایف طراحی در کنار کاستن از ریسک دوباره‌کاری است. نتایج شبیه‌سازی‌های زمان‌گسسته نشانگر برتری نسبی طرح پیشنهادی نسبت به مدل‌های رایج از منظر زمان تکمیل است. این در حالی است که در این روش در عمل ریسک بازخورد در پایین‌ترین سطح ممکن قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی

ماتریس ساختار طراحی، ماتریس تبدیل کار، بهبود فرایند طراحی، ریسک کمینه، سیاست کاری

۱. مقدمه

در پروژه‌های صنعتی، دوباره‌کاری سهمی بزرگ از زمان تکمیل را به‌خود اختصاص می‌دهد. در حالی‌که بخشی از دوباره‌کاری‌ها اجتناب‌ناپذیر است، بخش دیگر از انجام نادرست وظایف ناشی می‌شوند. بدین‌ترتیب، کیفیت و پایداری فرایند به‌گونه‌ای تحت تأثیر قرار می‌گیرد که یکی از پیامدهای آن افزایش زمان تکمیل پروژه خواهد بود. هرچند مدل‌های دنباله‌ای[۱] فرایند فاقد هرگونه ریسک دوباره‌کاری هستند، زمان تکمیل فرایند در آنها می‌تواند به‌دلیل وجود صفوف طولانی از وظایف زیاد باشد. از سوی دیگر،

در حالی‌که مدل‌های کاملاً موازی[۲] صفوف کوتاه‌تری از وظایف را شامل می‌شوند، ممکن است با حجم دوباره‌کاری بیشتری همراه باشند. در نهایت، مدل‌های همپوشان[۳] اغلب بدین‌دلیل توسعه می‌یابند که صفوف کوتاه‌تری از وظایف را تولید کرده، در حالی‌که میزان دوباره‌کاری در آنها نیز به‌مقدار قابل‌قبولی پایین است. یافتن مقدار بهینه برای همپوشانی یک جنبهٔ جذاب برای پژوهش به‌شمار می‌آید. در این پژوهش، از یک مدل مبتنی بر ماتریس تبدیل کار برای کمینه‌سازی ریسک دوباره‌کاری استفاده شده که در آن امکان همپوشانی اجزای مختلف فرایند در قابل یک الگوی رشد تدریجی فراهم است. در این مدل از تحلیل ساختار ویژه برای محاسبهٔ امکان همگیری[۴] بین اجزای فرایند استفاده شده و تلاش شده تا بازخوردهای فرایند با بیشینه‌سازی میزان همپوشانی بین وظایف تنظیم شوند. طرح اجرایی[۵] با ریسک کمینه در یک بستهٔ نرم‌افزاری تحت عنوان نرم‌افزار طرح اجرایی با ریسک کمینه[۶] پیاده‌سازی شده که با استفاده از شبیه‌سازی زمان‌گسسته امکان پیش‌بینی زمان تکمیل فرایند را فراهم می‌سازد. به‌منظور نمایش کارآمدی روش پیشنهادی، از فرایند طراحی بالگرد ترابری ای. اچ. ۱۰۱ به‌عنوان مورد مطالعاتی استفاده شده است. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار طرح اجرایی با ریسک کمینه با برخی از مدل‌های موجود، نشانگر برتری الگوی رشد تدریجی از منظر زمان تکمیل پروژه می‌باشد. این مدل‌ها شامل مدل‌های دنباله‌ای، کاملاً موازی و موازی شکسته[۷] می‌گردند.

بخش‌های مقاله، به‌گونه زیر سازمان یافته‌اند. با توجه به گستردگی ادبیات مورد نیاز برای طرح دقیق موضوع، بخش ۲ تحت عنوان پیشینه بدان اختصاص داده شده است. در بخش ۳ مورد مطالعاتی معرفی شده و با استفاده از ماتریس تبدیل کار فرایند آن، الگوی رشد تدریجی، تعیین اولویت برای اجزای بلوک‌های همگیر[۸] و طراح اجرایی با ریسک کمینه به‌یاری مثال تشریح شده‌اند. بخش ۴ با ارائهٔ نتایج روش پیشنهادی همراه بوده و یک مقایسه با مدل‌های موجود شامل دنباله‌ای، کاملاً موازی و موازی شکسته انجام پذیرفته است. در بخش ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای بهبود طرح آورده شده است.

۲. پیشینه

بازار رقابتی، کاهش زمان و هزینه توسعه را در کنار حفظ حداقل کیفیت مورد نیاز ضروری می‌سازد [۱]. یک پروژهٔ طراحی پیچیده اغلب شامل تعداد زیادی از وظایف همگیر می‌شود که لازم است توسط شبکه‌ای از افراد متخصص انجام شود. این واقعیت مدیریت کارآمد فرایند را ضروری می‌سازد [۲]. تکرار یک ویژگی ذاتی پروژه‌های طراحی پیچیده است [۳]. این ویژگی مستلزم دوباره‌کاری یا بهبود است که با بازگشت به تصمیمات قبلی برای ایجاد تغییرات همراه است. شکست در همگرایی به ویژگی‌های طراحی می‌تواند به بروز تکرارهای ناخواسته بیانجامند [۴].

اغلب، برخی از تصمیمات طراحی زمانی اتخاذ می‌شوند که اطلاعات کافی برای تکمیل آنها وجود ندارد. با به‌دست آمدن این اطلاعات لازم است وظایف متبوع تکرار شده تا طراحی محصول به مشخصات مورد نیاز طراحی نزدیکتر گردد [۵]. همچنین ممکن است دوباره‌کاری از تغییر اطلاعات مبادله‌شده بین وظایف همپوشان و همگیر نشأت گرفته باشد [۶]. برای شتاب بخشیدن به فرایند توسعه مبتنی بر تکرار در محصولات پیچیده دو راه‌کار پیشنهاد شده است: انجام سریع‌تر تکرارها و اقدام برای کاستن از تعداد آنها، که به‌گونهٔ منطقی برای تکرارهای ناخواسته صادق است [۷].

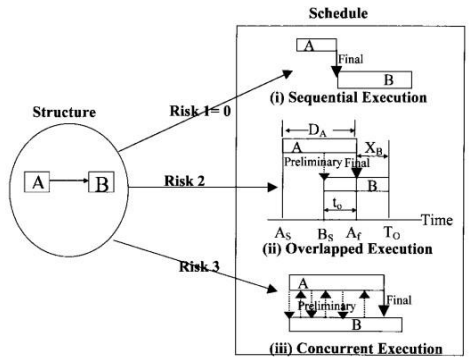
تکرارهای سریع‌تر را می‌توان با بهبود هماهنگی بین افراد، استفاده از فناوری‌های جدید، یکپارچه‌سازی ابزارهای تحلیل مهندسی، و حذف فعالیت‌های کندکننده به انجام رسانید. در مقابل، تکرارهای کمتر را می‌توان با بهبود ساختار فرایند طراحی محقق ساخت. از جمله، می‌توان به واهمگیری[۹] فعالیت‌ها و ترتیب‌دهی بهبودیافتهٔ آنها اشاره کرد که در یک ماتریس ساختار طراحی به‌گونه‌ای مؤثر قابل انجام است [۳]. ماتریس ساختار طراحی ابزاری فشرده برای نمایش روابط و جریان‌های اطلاعات بین اجزای فرایند است [۸]. این ابزار نخستین‌بار توسط استوارد معرفی شده [۹] و با پژوهش‌های دههٔ ۹۰ در دانشگاه ام. آی. تی.[۱۰] قوام یافت [۲].

بسته به کاربری، ماتریس‌های ساختار طراحی را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود: استاتیک و زمان‌پایه [۱۰]. در حالی‌که ماتریس‌های ساختار طراحی استاتیک وجود هم‌زمان اجزای سامانه را نشان می‌دهند، می‌توان آنها را برای نمایش اجزای فیزیکی یا اجزای یک سازمان به‌کار گرفت. در ماتریس‌های ساختار طراحی زمان‌محور، ترتیب سطرها و ستون‌ها نشانگر جریان زمانی اطلاعات است که در آن اجزای بالادست نسبت به اجزای پایین‌دست اولویت دارند. بدین‌ترتیب می‌توان مفاهیم پیش‌خورد و

بازخورد را نسبت به وجوه مشترک تعریف کرد [۱۱]. براونینگ و اپینگر در یک پژوهش پیش‌گامانه بین ماتریس تبدیل کار با قطر اصلی صفر و ماتریس ضرایب یک سامانه کنترلی در فضای حالت همانندی برقرار کرده و مفهوم ماتریس تبدیل کار را تبیین نمودند [۱۲].

کیم [۱۳] و اونگ و همکاران این نمایش را بهبود بخشیدند و کاستی‌های آن را برطرف ساختند. درنهایت درباره چگونگی تخصیص منابع برای کنترل فرایند بحث شده است [۱۴]. کوثری و همکاران از دیدگاهی گسترده‌تر نشان دادند که در یک ماتریس تبدیل کار، ماتریس‌های همسایه یک بلوک همگیر از وظایف در نقش وجوه مشترک اطلاعاتی آن عمل می‌کنند. با برقراری همانندی بین آنها و ماتریس‌های ضرایب و خروجی یک سامانهٔ کنترلی در فضای حالت، امکان تعریف ویژگی‌های کنترل‌پذیری، کنترل‌پذیری خروجی و تخمین‌پذیری فرایندهای پیچیده به‌عنوان یک سامانهٔ دینامیکی وجود دارد [۱۱].

مدل‌های سه‌گانه اصلی در تحلیل فرایند طراحی محصولات پیچیده با توجه به نحوهٔ وابستگی اطلاعاتی وظایف تعریف می‌گردد. این مدل‌ها شامل انواع دنباله‌ای، موازی و همپوشان می‌شوند (شکل ۱) [۷].



شکل ۱. مقایسهٔ بین مدل‌های دنباله‌ای، همپوشان و هم‌زمان [۳]

در مدل دنباله‌ای، هر وظیفه وابسته به اطلاعات تولیدشده در وظایف بالادستی خود بوده و وظایف پایین‌دستی نیازمند اطلاعات آن می‌باشند. در نتیجه، وظایف یکی پس از دیگری و با تبعیت از تکرارهای محتمل انجام می‌شوند. پژوهش‌های مک‌دانیل به‌عنوان نخستین مدل دنباله‌ای قطعی [۱۵]، اسمیت و اپینگر به‌دلیل اولین پیاده‌سازی مدل در قالب ماتریس ساختار طراحی [۱۶]، احمدی و وانگ از منظر واردکردن احتمالات دینامیکی تکرار و آثار یادگیری [۱۷]، از قابل توجه‌ترین پژوهش‌ها در این دسته از مدل‌ها به‌شمار می‌آیند. مدل مبتنی بر زنجیره پاداش مارکوف از نصر و یاران که برای مواجهه با فرایندهای پیچیده توسعه یافته، یکی از جدیدترین تلاش‌ها در این زمینه به‌شمار می‌آید [۵].

در مدل‌های موازی، هیچ‌گونه وابستگی اطلاعاتی بین وظایف وجود ندارد. در نتیجه، این مدل‌ها شامل اجرای همزمان چندین وظیفه هستند که بر اساس آن مبادلهٔ اطلاعات به‌گونه همزمان انجام می‌پذیرد. هرچند در واقعیت این وضعیت در عمل رخ نمی‌دهد، اما استفاده از این فرض نتایج مفیدی درپی دارد.

نخستین‌بار اسمیت و اپینگر پیشنهاد یک مدل کاملاً موازی را دادند که در آن وظایف همگی به‌شکل همزمان انجام می‌پذیرند [۱۸]. این‌گونه مدل مبنای پژوهش‌های دیگری از جمله [۱۹] نیز می‌باشد. در حالی‌که مدل‌های دنباله‌ای ریسک دوباره‌کاری کمتری دارند، زمان تکمیل آنها اغلب بیش از اندازه زیاد است [۲۰]. در مقابل، مدل‌های کاملاً موازی، که زمان تکمیل مناسبی را پیشنهاد می‌دهند، در عمل محدودیت‌هایی جدی دارند [۲۱].

زمان دوباره‌کاری زیاد از دیگر مشکلات احتمالی است که می‌تواند تهدیدی برای تکمیل پروژه به‌شمار آید [۲۴]. شکستن بلوک‌های بزرگ از وظایف همگیر یک روش پیشنهادی برای کاستن از مشکلات احتمالی استفاده از مدل‌های کاملاً موازی است [۲۴]. این کار گاهی به‌شکل کنار گذاشتن وظایف کم‌اهمیت‌تر از طریق برش بازخوردهای مربوطه انجام می‌شود [۲۵].

فعالیت‌های همگیر، نوع سوم ارتباط را بین وظایف طراحی مطرح می‌سازند که در آن، دو یا چند وظیفه به‌شکل متقابل وظیفهٔ تأمین اطلاعات مورد نیاز یکدیگر را برعهده دارند. مدلسازی این نوع ارتباط، که ذاتاً در سامانه‌های پیچیده دیده می‌شود، توسط مدل‌های دنباله‌ای و کاملاً موازی امکان‌پذیر است. با این‌وجود، به‌منظور دستیابی به بهترین پاسخ، ترکیبی از ویژگی‌های دو نوع مدل یادشده برای داشتن همپوشانی منطقی اغلب بهترین گزینه خواهد بود.

با توجه به این موضوع مدلسازی در چارچوب ماتریس ساختار طراحی می‌تواند کارگشا باشد [۲۶]. ایت‌صالحه و همکاران راهبردهای تکرار دنباله‌ای و موازی را برحسب مصالحه بین زمان و هزینه مقایسه کردند [۲۷]. در حالی‌که زمان پیشنهادی توسط توسط مدل‌های همپوشان چیزی بین مدل‌های دنباله‌ای و کاملاً موازی است، دستیابی به آن به‌دلیل پایین‌بودن ریسک دوباره‌کاری (برخلاف مدل‌های کاملاً موازی) اغلب عملی است [۴]. یکی از

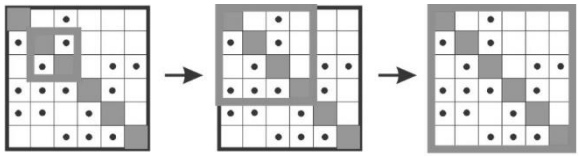
جامع‌ترین مقایسه‌ها بین سه روش مدل‌سازی یادشده در پژوهش یاسین و همکاران انجام شده است. آنها نشان دادند که با انتخاب یک طرح بهینه می‌توان برای رسیدن به بهترین زمان تکمیل اقدام نمود (شکل ۱) [۱۹].

در یک پژوهش جدیدتر، مایر و همکاران مدلی توسعه داده‌اند که همپوشانی وظایف، سرعت‌بخشی به آنها و تکرار را با استفاده از یک بانک از هزاران مسئلهٔ نمونه پوشش می‌دهد [۲۸]. پژوهش‌هایی که تاکنون برای افزایش همپوشانی در فرایند انجام پذیرفته‌اند، با وجود تنوع رهیافت‌ها همگی سرشتی شبه‌بهینه دارند. در این بین، یان و همکاران از برنامه‌ریزی دنباله‌ای درجهٔ دوم [۲۹]، وانگ و یان از تقسیم فرایند به چند قسمت با امکان بازبینی [۳۰] و کوک و کوتس از روشی هیوریستیک تحت عنوان تقسیم و ترکیب [۳۱] بهره گرفته‌اند.

در حالی‌که مدل‌های همپوشان بسیاری از این محدودیت‌های انواع دنباله‌ای و کاملاً موازی را ندارند، در ابتدا، به‌سادگی قابل اعمال به چندین وظیفهٔ همزمان نیستند. برای مقابله با این مشکلات می‌توان شبیه‌سازی زمان گسسته را پیشنهاد نمود. شبیه‌سازی زمان گسسته امکان تغییر نوبت وظایف را به‌شکل دلخواه فراهم می‌سازد [۲۱]. همین‌گونه می‌توان آثار تصادفی [۳۲]، و تغییرات زمانی (نظیر پدیدهٔ یادگیری) [۱۲] را در شبیه‌سازی لحاظ نمود.

نخستین شبیه‌سازی مبتنی بر ماتریس ساختار طراحی به براونینگ و اپینگر نسبت داده می‌شود [۱۲]. در این مدل، قیود منابع در نظر گرفته نشده و کار بر فرضیات نسبتاً محدودکننده‌ای استوار است. برخی از این مشکلات در پژوهش [۲۰] رفع شده‌اند. در ادامه، یک مدل نسل دوم توسط چو و همکاران در [۲۱] توسعه یافته که ساختارهای مبتنی بر اطلاعات ماتریس ساختار طراحی و تحلیل زمان‌بندی مبتنی بر شبکه را به‌گونهٔ همزمان دربرمی‌گیرد.

پژوهش جاری نیز در بخش اعتبارسنجی مبتنی بر یک شبیه‌سازی زمان گسسته استوار است. با درنظر گرفتن پژوهش‌های پیشین، هدف از این مقاله معرفی یک روش نوین برای به‌سازی فرایند طراحی محصولات پیچیده (نظیر بسیاری از سامانه‌های هوافضایی) است. این روش مبتنی بر الگوی رشد تدریجی است که در آن بازخوردهای بین وظایف به‌تدریج و با تکمیل طراحی لحاظ می‌شوند (شکل ۲). هرچند در نگاه نخست این الگو تولید یک مدل همپوشان را نوید می‌دهد، در عمل دامنهٔ گسترده‌ای از طرح‌های اجرایی وجود دارند که مدل‌های دنباله‌ای، کاملاً موازی و موازی شکسته از آن جمله‌اند. از ویژگی‌های برجستهٔ الگوی رشد تدریجی پویا بودن مدل‌های به‌دست‌آمده از آن است؛ به‌گونه‌ای که ساختار طراحی در گام‌های نخست بیشتر به یک مدل کاملاً موازی شبیه است، در حالی‌که با پخته‌شدن طرح به یک مدل دنباله‌ای تبدیل می‌گردد (گام‌های میانی را می‌توان متناظر با مدل‌های موازی شکسته دانست). این کار استفاده از ویژگی‌های برتر هر سه دسته از این مدل‌ها را برای داشتن زمان تکمیل کمتر و همین طور پایین‌ترین ریسک، امکان‌پذیر می‌سازد.



شکل ۲. یکپارچه‌سازی زیربلوک‌ها برای دستیابی به بلوک همگیر اصلی

روش پیشنهادی توسط نگارندگان ترکیبی از مدل‌های موازی، دنباله‌ای و همپوشان است که در آن مفهوم مشاهده‌پذیری نقشی راهنمایانه در شناسایی لایه‌های دینامیکی فرایند بازی می‌کند. این روش نیز به مانند پژوهش‌های دیگر شبه‌بهینه می‌باشد [۲۹]. الگوی رشد تدریجی با استفاده از تحلیل ساختار ویژه (به‌عنوان راهنما و نه ابزار اصلی مثل [۷]) ریسک را در پایین‌ترین حد ممکن حفظ می‌کند.

به‌منظور اعتبارسنجی و مقایسهٔ روش پیشنهادی، بستهٔ نرم‌افزاری طرح اجرایی با ریسک کمینه برای شبیه‌سازی زمان گسسته مبتنی بر نمونه‌برداری مونته‌کارلو توسعه یافته است. به‌شکل خلاصه مزایای الگوی رشد تدریجی شامل موارد زیر است:

۱. زمان‌بندی ساده و مؤثر وظایف براساس تحلیل ساختار ویژه
۲. سیاست اجرای ریسک کمینه که زمان تکمیل را کاسته و همین‌گونه احتمال دوباره‌کاری را کمینه می‌سازد
۳. تشخیص درست فعالیت‌های پایین‌دست برای اجرای آنها به‌صورت موازی

۳. روش کار

در این بخش روش انجام کار تشریح می‌شود. بر این اساس می‌توان زیربخش‌های زیر را معرفی کرد:

۱. افرازبندی بلوک همگیر

۲. یکپارچه‌سازی گام‌به‌گام بلوک‌ها
۳. توصیف ترتیب اجرای وظایف (طرح اجرایی)

۳-۱. افرازبندی بلوک همگیر

به‌منظور آشنایی با روش افرازبندی بلوک همگیر لازم است در مورد تحلیل ساختار ویژهٔ ماتریس تبدیل کار[11] بحث شود. اسمیت و اپینگر بردار کار را در این چارچوب به‌گونهٔ زیر تعریف نموده‌اند [۴]:

$$U = S(I - \Lambda)^{-1}S^{-1}u_0 \qquad (۱)$$

که در آن U بردار کار، S ماتریس متشکل از بردارهای ویژه ماتریس تبدیل کار، I ماتریس واحد، Λ ماتریس مقدار ویژه و u_0 بردار کار اولیه می‌باشند. در اینجا می‌توان با بررسی ساختار ویژه، درباره رفتار تکمیل وظایف و زمان تکمیل یک بلوک همگیر تصمیم‌گیری نمود. این روش پیشنهادی (تحلیل ساختار ویژه) به‌دلیل سادگی کاربرد و سرانگشتی بودن دارای اهمیت است [۳۳].همان‌گونه که اشاره شد، ماتریس تبدیل کار یک نسخهٔ عددی از ماتریس ساختار طراحی است که تبادل کار بین وظایف سازنده یک فرایند را نمایش می‌دهد. در واقع، حجم دوباره‌کاری برای هر وظیفه از سوی دیگر وظایف را می‌توان از این طریق به‌دست آورد. چون تمامی دوباره‌کاری به‌گونهٔ تجمعی در یک پارامتر بروز می‌کند، ماتریس حاصل از این جهت، مثبت معین می‌باشد. به‌شکلی مشابه، چون عوامل بازخورد عموماً کوچکتر از ۱ هستند (در فرایندهای همگرا)، بیشترین مقدار هر بردار ویژه نیز کمتر از ۱ است [۳۴]. با مقایسهٔ بزرگترین عناصر بردارهای ویژه در بلوک‌های همگیر می‌توان زمان مورد نیاز برای تکمیل آنها را تخمین زد. در نتیجه، با کاهش ابعاد یک بلوک همگیر (با خرد کردن بلوک یا حذف برخی از فعالیت‌ها) می‌توان زمان تکمیل پروژه را کاهش داد [۱۱].هرچند کاهش ابعاد بلوک‌های همگیر به کاهش زمان تکمیل تخمینی می‌انجامد، اما با این کار جریان اطلاعات در برخی از بازخوردها نادیده گرفته می‌شود. این کار به‌معنای آغاز برخی از وظایف بدون داشتن اطلاعات کافی است که اصولاً با ورود فرضیاتی همراه بوده که یکی از منابع اصلی بروز عدم اطمینان و ریسک در فرایند به‌شمار می‌آیند. در نتیجه عاقلانه نیست تا ابعاد یک بلوک همگیر را بدون در نظر گرفتن افت ناشی از اتلاف اطلاعات موجود بین وظایف آن کاهش داد. این کار تحت عنوان ریسک دوباره‌کاری شناخته می‌شود [۱۲].

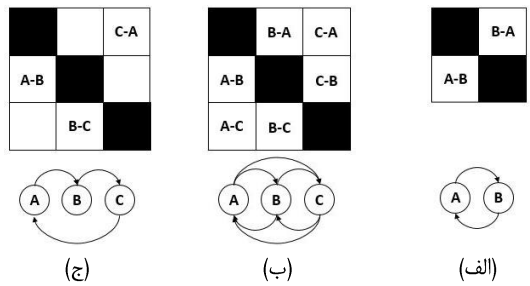
برای مقابله با ریسک دوباره‌کاری دو راه کلی پیشنهاد می‌شود: راه نخست به تمهید یک تابع هزینه ریسک و کمینه‌سازی آن بازمی‌گردد. این روش برای نمونه در پژوهش‌های [۲۰] و [۲۵] به‌کار رفته و الگوریتم‌های بهینه‌سازی هیوریستیک بدین‌منظور به‌کار گرفته شده‌اند. راه دوم که برای نخستین‌بار در این پژوهش بدان اشاره شده است، تشکیل بلوک‌های همگیر از پایه و رعایت اصولی برای کمینه‌سازی ریسک دوباره‌کاری است [۳۳]. با توجه به این موضوع، وظایف مستقل همپوشان هیچ‌گونه ریسک دوباره‌کاری را ایجاد نمی‌کنند؛ زیرا هیچ‌گونه جریان اطلاعات بین آنها وجود ندارد. اما با همپوشانی دو یا چند وظیفهٔ هم‌درگیر، احتمال دوباره‌کاری با خروجی‌های هر وظیفه وجود دارد [۷]. بدین‌ترتیب مدل کاملاً موازی از وظایف همگیر ریسک رویارویی با زمان دوباره‌کاری بیش از انتظار را به‌همراه خواهد داشت.

۳-۲. یکپارچه‌سازی گام‌به‌گام بلوک‌ها

همان‌گونه که گفته شد، در این پژوهش توسعهٔ بلوک‌های همگیر از وظایف تشکیل‌دهندهٔ آنها مدنظر است. زیربلوک‌هایی که در این کار تشکیل می‌شوند به‌عنوان گره‌های موضعی (یا نقاط شکل‌گیری زیربلوک‌ها همگیر) عمل کرده و می‌توان با یکپارچه‌سازی آنها به‌گونهٔ تدریجی به بلوک اصلی رسید (شکل ۲). این کار به‌شکل وارون می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای شکست بلوک همگیر اصلی به زیربلوک‌های کوچکتر و وظایف به‌کار گرفته شود.

بیشترین سطح همگیری در وظایفی دیده می‌شود که به‌شکل مستقیم اطلاعات یکدیگر را تأمین و مصرف می‌کنند. این همگیری می‌تواند به تعداد زیادی تکرار برای رسیدن به نتیجهٔ نهایی بینجامد. همان‌گونه که در [۱۸] دیده می‌شود، می‌توان یک فرایند را با کوتاه کردن حلقه‌های بازخورد سریعتر نمود. در یک ماتریس ساختار طراحی این کار را می‌توان از طریق بازآرایی فعالیت‌ها به‌شکلی به انجام رسانید که علائم بالای قطر اصلی تا حد امکان به آن نزدیک شوند [۳۱]. با کنار هم گذاشتن دو یا چند وظیفه دارای همگیری بالا در یک زیربلوک، می‌توان به این هدف دست یافت [۳۳]. در گام نخست لازم است یک شاخص برای سطح همگیری انتخاب شود. در اینجا این‌گونه تعریف می‌شود که گروهی از وظایف دارای بیشترین همگیری هستند که تعداد

کمتری از آنها یک حلقهٔ بسته از اطلاعات را بسازد. در نتیجه، همگیرترین فعالیت‌ها جفتی از آنها هستند که با هم تبادل اطلاعات دارند (شکل ۳ الف). یک راه مناسب برای یافتن این جفت‌ها و همین‌گونه سطح همگیری آنها، استفاده از تحلیل ساختار ویژه است. در نتیجه، دو وظیفه زمانی همگیر هستند که بردار ویژه آنها صفر نبوده و مقدار همگیری آنها با مقدار بزرگترین عنصر بردار ویژه آنها سنجیده می‌شود [۴]. به‌شکل مشابه می‌توان سطح همگیری بین بیش از دو ظیفه را شناسایی و اندازه‌گیری کرد.



شکل ۳. همگیری الف) دو وظیفه، ب) بین سه وظیفهٔ کاملاً همگیر، ج) چرخه‌ای بین سه وظیفه

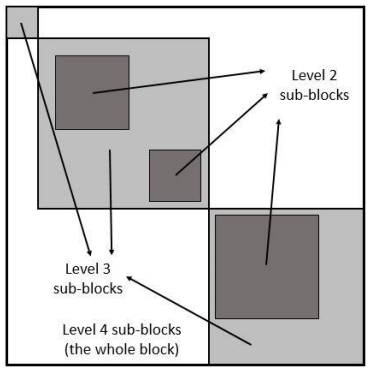
همان‌گونه که گفته شد، داشتن یک جریان اطلاعاتی مستقیم دوجانبه به همگیری می‌انجامد. این در حالی است که در برخی از موارد همگیری بین دو عنصر نمونه ناشی از ارتباط مستقیم آنها نیست. این وضعیت به یک عنصر میانی بازمی‌گردد که یک ارتباط چرخه‌ای ایجاد می‌کند (شکل ۳ ب). هر دو نوع از این همگیری‌ها با استفاده از آزمون بردار ویژه برای تعداد بیشتری از عناصر قابل تشخیص است.

۳-۳. یکپارچه‌سازی گام‌به‌گام بلوک‌ها

با توجه به مطالب یادشده، می‌توان یک طرح برای یکپارچه‌سازی بلوک‌های همگیر از وظایف پیشنهاد داد. در اینجا، صحبت از دو نوع یکپارچه‌سازی است که ظاهراً متعارض اما از دید فنی قابل مصالحه می‌باشند.

۱. یکپارچه‌سازی سلسله‌مراتبی
۲. یکپارچه‌سازی اطلاعاتی

یکپارچه‌سازی سلسله‌مراتبی بر تجزیهٔ یک سامانه به اجزای سازندهٔ آن استوار است. از این منظر، پارامترهای سطح پایین به هم پیوسته تا وظایف را ایجاد نمایند. یکپارچه‌سازی سلسله‌مراتبی یک فعالیت اصلی در مدل فرایندی وی[۱۲] به‌شمار می‌آید [۲۲]. از دیدگاه یکپارچه‌سازی اطلاعاتی، گروه‌بندی وظایف به بلوک‌های همگیر براساس جریان اطلاعات بین آنهاست. این وضع تا حدی مشابه تجزیه / یکپارچه‌سازی یک سامانه در دامنهٔ فرایندی می‌باشد. برای مثال، براونینگ از ماتریس ساختار طراحی برای یکپارچه‌سازی فرایند از طریق وجوه‌مشترک وظایف اقدام کرده است [۱۰].



شکل ۴. سطوح همگیری برای یک ماتریس تبدیل کار نوعی (۴ سطح)

در این مقاله روشی برای یکپارچه‌سازی اجزای سازندهٔ بلوک‌های همگیر به بلوک همگیر اصلی پیشنهاد شده است. نخستین گام در ساختن یک بلوک همگیر از وظایف، شناسایی همگیری‌های اصلی در آنهاست. این کار از طریق بررسی ساختار ویژه و با گسترش گره‌های موضعی و از راه ترکیب بلوک‌های کوچکتر به بلوک‌های بزرگتر امکان‌پذیر است. درنهایت، با ترکیب تدریجی زیربلوک‌ها کل بلوک همگیر به‌دست می‌آید (شکل ۲).

برای گسترش گره‌های موضعی، راهبردهای متنوعی وجود دارد. یکی از این راهبردها بررسی سطح بالاتر همگیری‌هاست؛ در حالی‌که به‌عنوان راه دیگر می‌توان بیشینه‌سازی سطح انتقال اطلاعات بین اجزا را در نظر گرفت. در این مقاله، ترکیب گره‌های موضعی به گره‌های بزرگتر براساس بالاتر بودن سطوح همگیری بین آنها صورت می‌پذیرد [۳۳]. در اینجا لازم است برخی از نقاط ابهام دربارهٔ روش گسترش گره‌های موضعی برطرف گردند. ترتیب زیربلوک‌ها در بلوک جدید چگونه باید باشد؟ فرض می‌شود که در هنگام ترکیب زیربلوک‌ها، محتویات هر زیربلوک بدون تغییر ترتیب حفظ می‌گردند (ساختار حفظ می‌شود). به‌عبارت دیگر، یک زیربلوک بدون تغییر ساختاری، در بلوک جدید تنها به بالا یا پایین حرکت می‌کند (زیربلوک‌ها با سایهٔ یکسان در شکل ۴).در اینجا، گام‌های طرح اجرایی با ریسک کمینه به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

۱. گام اول فراهم کردن یک الگوی رشد تدریجی

۲. گام دوم تعیین اولویت برای اجزای بلوک‌های همگیر با رعایت دو شرط زیر

الف) زیربلوک‌هایی که در بالاتر و راست‌تر قرار گرفته‌اند، باید آنهایی باشند که دارای اجزای ناصفر کمتری هستند (قاعدهٔ ۱)

ب) خانه‌های پر باید تا حد امکان نزدیک به قطر اصلی قرار گیرند (قاعدهٔ ۲)

۳. گام سوم پیاده‌سازی طرح اجرایی با ریسک کمینه

۴. مورد مطالعاتی

در این مقاله، یک بلوک همگیر از وظایف مرتبط با فرایند طراحی بالگرد ترابری ای. اچ. ۱۰۱ (شکل ۵) به‌عنوان مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده که ماتریس تبدیل کار آن در شکل ۶ آمده است.

شکل ۵. بالگرد ترابری ای. اچ. ۱۰۱ [۳۵]

از این‌جا به بعد، وظایف براساس ترتیب ارائه شده در این شکل نامیده و یاد می‌شوند. بالگرد یادشده نخستین پرواز خود را در سال ۱۹۸۷ م انجام داده است. نکته‌ای که ذکر آن در اینجا ضرورت دارد این است که هدف از این پژوهش صرفاً دوباره طراحی این وسیلهٔ پرنده نیست؛ بلکه استفاده از فرایند طراحی مورد استفاده در آن برای الگوگیری و بهره‌برداری در محصولات همرده می‌باشد. این کار از جایی وجاهت دارد که با وجود گوناگونی طراحی‌ها برای پرنده‌های بالگردان در این کلاس مأموریتی، فرایند طراحی آنها با هم تفاوت چندانی نداشته (جریان اطلاعات طراحی بین زیرسامانه‌ها) و با گذشت بیش از سه دهه از این کار، می‌توان از آن به‌عنوان یک نقطهٔ آغاز استفاده کرد. به‌علاوه، هدف نمایش کارایی روش پیشنهادی است و نتایج برای استناد در پروژه‌های واقعی نیازمند در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص در هر مورد است. در ادامه به تشریح طرح اجرایی با ریسک کمینه پرداخته و پیاده‌سازی آن روی مورد مطالعاتی ارائه شده است.

۴-۱. الگوی رشد تدریجی

در الگوی رشد تدریجی تلاش می‌شود تا زیربلوک‌هایی از وظایف با بیشترین همگیری ترکیب شده و تعداد وظایف درگیر از کم به زیاد تغییر کند. در این طرح به‌گونه‌ای عمل می‌شود تا به تشکیل زیربلوک‌های کوچکتر اولویت داده شود. به‌کارگیری نرم‌افزار طرح اجرایی با ریسک کمینه، که از الگوریتم هیوریستیک نرم‌سازی شبیه‌سازی شده[۱۳] استفاده می‌کند، راهبردی را برای نحوهٔ ترکیب وظایف به‌منظور دستیابی به بلوک همگیر اصلی پیشنهاد می‌دهد. به‌دلیل سرشت تصادفی این وسیله، با هر بار اجرا طرح‌های متفاوتی حاصل می‌گردد. این کار به تولید یک مجموعه از نتایج شبه‌بهینه می‌انجامد. رویهٔ کار بدین‌گونه است که ابتدا امکان تشخیص و ترکیب وظایف همگیر به تعداد دو و در ادامه افزایش آن به بیش از دو وظیفه فراهم می‌گردد. استفاده از مقدار ویژه بیشینه غیرصفر می‌تواند راهنمایی برای تشخیص همگیری بین وظایف یک بلوک قلمداد شود. برای پرداختن به این موضوع، ابعاد مسئله تعیین‌کننده است. برای مسائل کوچکتر امکان بررسی تمامی فضای نمونه برای یافتن وظایف همگیر وجود دارد. این در حالی است که برای مسائل بزرگتر درعمل این کار ممکن نبوده و باید فضا به‌شکل تصادفی و ترجیحاً با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هیوریستیک جستجو شود. دلیل نخست، تعداد جایگشت‌های فراوان ترکیب وظایف است که زمان مورد نیاز را به‌شکل تصاعدی بالا می‌برد. از سوی دیگر با افزایش ابعاد مسئله، همگیری بین وظایف به‌سرعت به کل بلوک منتهی می‌گردد که استفاده از الگوی رشد تدریجی را کم‌تأثیر و گاه بی‌فایده می‌نماید. بدین‌منظور لازم است یک حد برای انتخاب بین دو حالت تعیین شود. حاجی‌جعفری [۳۳] این مقدار را در نرم‌افزار طرح اجرایی با ریسک کمینهٔ ۱۲ پیشنهاد داده است.

۴-۲. تعیین اولویت برای اجزای بلوک‌های همگیر

هرچند در الگوی رشد تدریجی روشی برای ترکیب وظایف همگیر به زیربلوک‌های همگیر و رشد آنها پیشنهاد شد، ترتیب این وظایف در بلوک تشکیل شده سئوالی است که باید پاسخ داده شود. در اینجا دو قاعدهٔ یادشده در ابتدای این بخش به‌کار می‌آید. به‌شکل شهودی تعداد کمتر بازخوردها برای برآورده‌سازی هر دو قاعدهٔ مفید ارزیابی می‌شود. در حالی که تلاش می‌شود این بازخوردها به قطر اصلی نزدیکتر شوند، جای‌دادن آنها در یک

زیربلوک همگیر مزیت مناسبی در عمل ایجاد می‌کند [۱۱]. نکتهٔ جدید در این میان، شدت بازخوردهاست که باید در نظر گرفته شود. لازم است از بازخوردهای شدیدتر که با اعداد بزرگتر مشخص می‌شوند تا حد امکان جلوگیری شود. این کار امکان دوباره‌کاری و در نتیجه افزایش زمان تکمیل را کاهش می‌دهد.

٤-٣. طرح اجرایی با ریسک کمینه

برای طرح اجرایی با ریسک کمینه، ابتدا باید تعداد تکرارهای لازم برای همگرایی به پاسخ در یک بلوک همگیر از وظایف تخمین زده شود. به‌شکل معمول می‌توان تعداد تکرارهای لازم را برابر با تعدادی دانست که در آن بزرگ‌ترین مقدار بردار کار نرمال در تکرار i ام (رابطهٔ ۱) زیر ۵ درصد باشد [۲۸]. با یافتن تعداد تکرارهای مورد نیاز، نیاز به تطبیق بین مراحل الگوی رشد تدریجی (s) و تکرارهای مورد نیاز (m) است. مثال زیر به درک بهتر موضوع کمک می‌کند. اگر $m = 100$ و $n = 50$ باشد، لازم است به ازای هر دو تکرار یک مرحله از الگوی رشد تدریجی مد نظر قرار گیرد؛ یعنی به‌ازای هر تکرار، گام متناظر در الگوی رشد تدریجی معیار ترتیب وظایف و نیز امکان بروز بازخوردها با در نظر گرفتن تشکیل زیربلوک‌های همگیر قرار می‌گیرد. در اینجا لازم ذکر سه نکته ضروری است: نخست اینکه تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به همگرایی باید همواره از مراحل رشد تدریجی بیشتر باشد. در غیر این‌صورت نیازی به استفاده از این طرح نبوده و مسئله به‌شکل سنتی حل می‌شود. دوم اینکه در صورت تقسیم‌پذیر نبودن تعداد تکرارها بهتر است اولویت با گام‌های انتهایی طرح باشد. برای مثال، چنانچه $m = 120$ و $n = 50$ باشد، آنگاه برای ۳۰ گام نخست هر کدام ۲ تکرار و برای ۲۰ گام نهایی هر کدام ۳ تکرار کنار گذاشته می‌شود. سوم، هرچند تعداد تکرارهای پیشنهادی اغلب محافظه‌کارانه بوده و کار پیش از رسیدن به این تعداد تکرار پایان می‌پذیرد، ممکن است برای همگرایی به پاسخ در انتهای مسیر نیاز به تعدادی تکرار باشد که اضافه بر سازمان محاسبه می‌گردد. این تکرارها روی بلوک همگیر (گام پایانی) به‌شکل کامل اعمال می‌شود.

٤-٤. اجرای نمونه

در اینجا برای نمونه خروجی یک بار اجرای نرم‌افزار طرح اجرایی با ریسک کمینه ارائه می‌گردد. این اجرا، شامل $s = 32$ گام بوده که ۶ گام شاخص آن (۳، ۹، ۱۳، ۱۷، ۲۹ و ۳۲) در ادامه آورده می‌شود. در مقابل با استفاده از رابطهٔ ۱ داریم:

در نتیجه، ۱۶ گام نخست با یک تکرار و سایر گام‌ها متناظر با ۲ تکرار می‌باشند. (به‌دلیل دشواری نمایش، بلوک‌ها در صورت لزوم در دو سطر آورده شده و با علامت ⋯ از هم جدا شده‌اند. همین‌طور $[\ ]^T$ علامت ترانهاده ماتریس است) امکان ترکیب دو وظیفهٔ [17] و [18] به‌دلیل همگیری وجود دارد. بدین‌ترتیب نخستین گره موضعی تشکیل می‌گردد. خواهیم داشت:

$$[1][2][3][4][5][6][7][8][9][10][11][12]$$
$$[19]\begin{bmatrix}17\\18\end{bmatrix}[16][15][14][13]\cdots$$

۰) وظایف [10] و [13] به‌ترتب به بلوک $\begin{bmatrix}17\\18\end{bmatrix}$ الحاق می‌شوند. همین‌طور دو گره موضعی جدید $\begin{bmatrix}7\\6\end{bmatrix}$ و $\begin{bmatrix}12\\4\end{bmatrix}$ از وظایف سازنده آنها تشکیل می‌گردند. ترتیب وظایف در بلوک‌ها هنگام تشکیل و رشد تابع روابط بین اجزا برای داشتن کمترین احتمال دوباره‌کاری است:

$$[14][9][11][16][1][15]\begin{bmatrix}12\\4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}7\\6\end{bmatrix}[5][3]\begin{bmatrix}18\\17\\10\\13\end{bmatrix}$$
$$[19][2][8]\cdots$$

۱) وظایف [8]، [5] و [9] به‌تدریج امکان الحاق به بلوک $\begin{bmatrix}12\\4\end{bmatrix}$ را می‌یابند. داریم:

$$[15]\begin{bmatrix}7\\6\end{bmatrix}[2][3]\begin{bmatrix}18\\17\\10\\13\end{bmatrix}[19]\begin{bmatrix}9\\8\\12\\4\\5\end{bmatrix}[11][14][16][1]$$

۲) به‌شکل مشابه بلوک $[5\quad 4\quad 12\quad 8\quad 9]^T$ وظایف [2] و [19] را جذب می‌کند. در این بین وظیفهٔ [16] به $[13\quad 10\quad 17\quad 18]^T$ اضافه می‌شود:

$$[1][14][15]\begin{bmatrix}7\\6\end{bmatrix}\begin{bmatrix}19\\2\\9\\8\\12\\4\\5\end{bmatrix}[11][3]\begin{bmatrix}18\\17\\10\\13\\16\end{bmatrix}$$

۳) پیش از پایان، باقیمانده وظایف به‌شکل زیر ترکیب می‌شوند:

$$[1\quad 11\quad 14\quad 7\quad 6\quad 19$$
$$2\quad 9\quad 8\quad 12\quad 4\quad 5\quad 3]^T\cdots$$
$$[15\quad 18\quad 17\quad 10\quad 13\quad 6]^T$$

1	Air Conditioning			0.2	0.2		0.2	0.2	0.2				0.2						
2	Auxiliary Electrics	0.2		0.2	0.2								0.5		0.2		0.2		0.2	
3	Avionics	0.2					0.5	0.7		0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.2	0.5			0.2	0.5
4	Bare Fuselage	0.7	0.2	0.7		0.7		0.7	0.7	0.7	0.2	0.5	0.7	0.2	0.2	0.2		0.2	0.2	0.5
5	Cabling & Piping	0.5	0.7	0.7	0.5		0.2	0.7		0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5				0.5	0.5
6	Eng. Auxiliaries							0.7			0.2									
7	Engines						0.2								0.2					
8	Eq. & Furnishings	0.2			0.2							0.2	0.2	0.2						
9	Fire Protection				0.2			0.2				0.2								
10	Flight Control System			0.2			0.2	0.2					0.2		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
11	Fuel				0.2		0.2	0.7					0.2							
12	Fuselage Add. Items				0.2															
13	Hydraulics				0.2						0.2		0.2					0.2	0.2	0.2
14	Ice & Rain Protection							0.5							0.2		0.2	0.2		
15	Main Rotor Blades													0.2		0.2				
16	Main Rotor Head										0.2			0.2	0.2			0.2	0.2	
17	Tail Rotor										0.2			0.2	0.2			0.2		
18	Transmission							0.5			0.2		0.2			0.2	0.2		0.2	
19	Weapons and Defense							0.2	0.2											

شکل ۶. ماتریس تبدیل کار برای فرایند طراحی بالگرد ترابری ای. اچ. ۱۰۱ ([۲۸])

15						0.2			0.2										
18	0.2		0.2	0.2					0.2										
17		0.2		0.2	0.2	0.2				0.5		0.2							
10	0.2	0.2	0.2			0.2				0.2	0.2	0.2							0.2
13		0.2	0.2	0.2								0.2					0.2		
16	0.2		0.2	0.2					0.2			0.2							
1										0.2	0.2				0.2	0.2	0.2		0.2
11										0.7	0.2					0.2	0.2		
14	0.2	0.2	0.2							0.5									
7									0.2		0.2								
6					0.2					0.7									
19										0.2					0.2				
2			0.2			0.2	0.2		0.2							0.5	0.2		0.2
9								0.2		0.2							0.2		
8					0.2		0.2	0.2								0.2	0.2		
12																	0.2		
4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2		0.7	0.5	0.2	0.7		0.5	0.2	0.7	0.7	0.7		0.7	0.7
5			0.5	0.5	0.5		0.5	0.5	0.5	0.7	0.2	0.5	0.7	0.7		0.5	0.5		0.7
3	0.5		0.2	0.5	0.2		0.2	0.2	0.2	0.7	0.5	0.5		0.2		0.5			

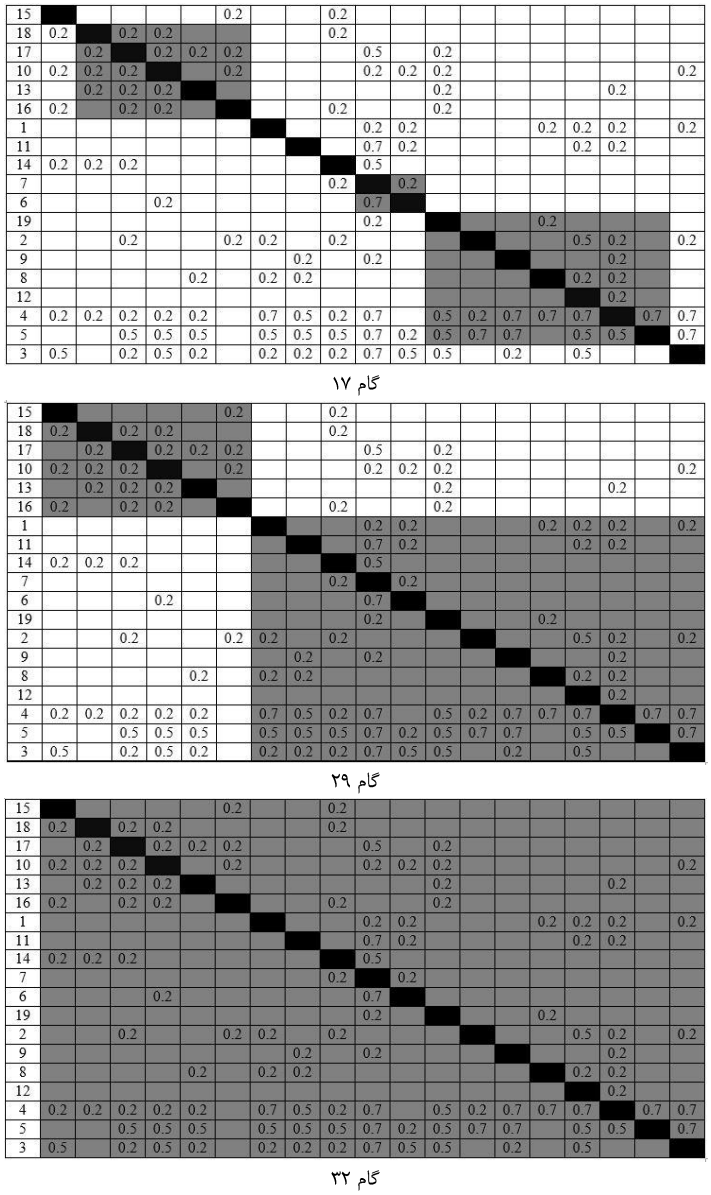
گام ۳

15						0.2			0.2										
18	0.2		0.2	0.2					0.2										
17		0.2		0.2	0.2	0.2				0.5		0.2							
10	0.2	0.2	0.2			0.2				0.2	0.2	0.2							0.2
13		0.2	0.2	0.2								0.2					0.2		
16	0.2		0.2	0.2					0.2			0.2							
1										0.2	0.2				0.2	0.2	0.2		0.2
11										0.7	0.2					0.2	0.2		
14	0.2	0.2	0.2							0.5									
7									0.2		0.2								
6					0.2					0.7									
19										0.2					0.2				
2			0.2			0.2	0.2		0.2							0.5	0.2		0.2
9								0.2		0.2							0.2		
8					0.2		0.2	0.2								0.2	0.2		
12																	0.2		
4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2		0.7	0.5	0.2	0.7		0.5	0.2	0.7	0.7	0.7		0.7	0.7
5			0.5	0.5	0.5		0.5	0.5	0.5	0.7	0.2	0.5	0.7	0.7		0.5	0.5		0.7
3	0.5		0.2	0.5	0.2		0.2	0.2	0.2	0.7	0.5	0.5		0.2		0.5			

گام ۹

15						0.2			0.2										
18	0.2		0.2	0.2					0.2										
17		0.2		0.2	0.2	0.2				0.5		0.2							
10	0.2	0.2	0.2			0.2				0.2	0.2	0.2							0.2
13		0.2	0.2	0.2								0.2					0.2		
16	0.2		0.2	0.2					0.2			0.2							
1										0.2	0.2				0.2	0.2	0.2		0.2
11										0.7	0.2					0.2	0.2		
14	0.2	0.2	0.2							0.5									
7									0.2		0.2								
6					0.2					0.7									
19										0.2					0.2				
2			0.2			0.2	0.2		0.2							0.5	0.2		0.2
9								0.2		0.2							0.2		
8					0.2		0.2	0.2								0.2	0.2		
12																	0.2		
4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2		0.7	0.5	0.2	0.7		0.5	0.2	0.7	0.7	0.7		0.7	0.7
5			0.5	0.5	0.5		0.5	0.5	0.5	0.7	0.2	0.5	0.7	0.7		0.5	0.5		0.7
3	0.5		0.2	0.5	0.2		0.2	0.2	0.2	0.7	0.5	0.5		0.2		0.5			

گام ۱۳



شکل ۷. الگوی رشد تدریجی نمونه برای مورد مطالعاتی بالگرد ترابری ای. اچ. ۱۰۱

۴) در نهایت خواهیم داشت:

$$[15 \quad 18 \quad 17 \quad 10 \quad 13 \quad 16 \cdots 1 \quad 11 \quad 14 \quad 7 \quad 6 \quad 19 \cdots 2 \quad 9 \quad 8 \quad 12 \quad 4 \quad 5 \quad 3]^T$$

گفتنی است تا رسیدن به گام ۵۲ (ماتریس کامل)، ترتیب وظایف و بلوک‌ها نشانهٔ ترتیب اجرا نبوده و تنها مجاورت برای امکان ترکیب را نشان می‌دهند. شش گام شاخص در شکل ۷ به نمایش درآمده‌اند. برای مطالعهٔ این شکل‌ها لازم است اعداد ستون اول با فعالیت‌های شکل ۶ تطبیق داده شوند. سایه‌های خاکستری رنگ دربرگیرنده بازخوردهایی است که میان وظایف در هر گام موجود است. برای مثال از گام ۹ به بعد، ارتباط دوسویه بین وظایف ۷ و ۶ از شکل ۶ (طراحی متعلقات موتور و طراحی موتور) در نظر گرفته می‌شود.

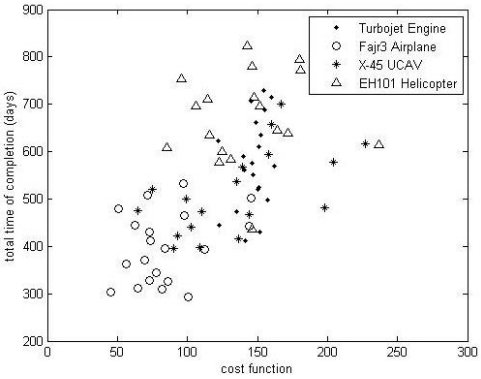
۵. نتایج

نتیجهٔ اعمال روش پیشنهادی به مورد مطالعاتی برای چندین تکرار در این بخش آورده شده است. به‌منظور دستیابی به برترین طرح‌ها لازم است معیاری در نظر گرفته شود. برای مثال می‌توان طرح‌های اجرایی را هر بار در شبیه‌سازی قرار داده و سپس نتایج را بر حسب زمان تکمیل مرتب نمود. این کار هرچند دقت مطلوبی برای تک‌داده‌ها دارد، اما از دید زمان صرف‌شده چندان منطقی به‌نظر نمی‌رسد. از سوی دیگر، نتایج شبیه‌سازی برای هر طرح اجرایی مبتنی بر متغیرهای تصادفی است که تکیه به داده‌های محدود را نامقعول ساخته و در نتیجه لازم است میانگینی از چندین داده برای هر طرح اجرایی در دسترس باشد. این وضعیت

اعتماد به نتایج به‌دست آمده برای طرح‌های اجرایی با امکان وقوع پایین را به‌شدت خدشه‌دار می‌سازد. با توجه به این موضوع مطلوب است یک ابزار برای مقایسهٔ سرانگشتی طرح‌های اجرایی در اختیار باشد. این ابزار باید بار محاسباتی کمی داشته و در عین‌حال به‌خوبی معرف ویژگی‌های زمانی هر طرح اجرایی باشد. همین‌طور این شاخص نباید به یک مورد مطالعاتی خاص وابستگی داشته و دستکم چند مورد مطالعاتی برای چگونگی سودمندی آن بررسی شده باشند. شاخص یادشده با تابع هزینهٔ ۲ معرفی شده و از این نقطه به بعد، تحت عنوان تابع هزینه از آن یاد می‌شود. شکل ۸ زمان تکمیل پروژه را برای ۲۰ بار اجرای نمونه مطالعاتی جاری و فرایند طراحی برای سه نمونه مطالعاتی هوافضایی دیگر نشان می‌دهد [۲۱، ۲۴، ۳۶]. همان‌گونه که از شکل ۸ به‌شکل کیفی و از ضرایب هم‌بستگی به‌صورت کمی برمی‌آید، می‌توان از تابع هزینه به‌عنوان شاخصی از زمان تکمیل پروژه استفاده نمود؛ بدین ترتیب که توابع هزینهٔ بالاتر از رابطهٔ ۲ به زمان‌های تکمیل بیشتری می‌انجامند. این در حالی است که این وضعیت تنها محدود به یک مورد مطالعاتی نیست.

$$cf = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=i+1}^{n} \left(A_{ij} \times (j-i)^2\right) \qquad (۲)$$

با توجه به شکل ۸ می‌توان دریافت که کمتر بودن تابع هزینه به‌معنای پایین‌بودن احتمالی زمان تکمیل پروژه است. از اینرو هدف یافتن طرح اجرایی با کمترین تابع هزینه است. برای این کار ۱۰۰۰ بار ماتریس تبدیل کار فرایند طراحی بر اساس طرح اجرایی با ریسک کمینه ساختاربندی شده است. جدول ۱، ۱۰ طرح اجرایی برتر را برحست تابع هزینه مربوطه نمایش می‌دهد. با توجه به پیچیدگی نمایش تمامی طرح اجرایی در قالب جدول، این طرح‌ها با حروف A تا J نمایش داده شده‌اند. در نهایت طرح اجرایی برگزیده از میان این ۱۰ گزینه با جزئیات و به‌عنوان طرح اجرایی با ریسک کمینه معرفی شده است. این کار پس از ۳۰ بار شبیه‌سازی زمان گسسته هر طرح اجرایی و معدل‌گیری از زمان تکمیل انجام پذیرفته است. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، طرح اجرایی D که دارای تابع هزینهٔ نسبتاً پایینی است. بهترین زمان تکمیل میانگین را برای ۳۰ بار اجرا به‌دست می‌دهد. از اینرو این طرح به‌عنوان گزینهٔ نهایی دارای ریسک کمینه انتخاب می‌شود. با استناد به رابطهٔ ۱ برای همگرایی به پاسخ‌های مطلوب در این طرح به ۴۸ تکرار نیاز است. این در حالی است که با اجزای نرم‌افزار ۱۶ گام برای تکمیل طرح پیشنهاد می‌شود. درنتیجه، به‌جز ۶ گام نخست با ۲ تکرار، سایر گام‌ها شامل سه تکرار می‌شوند. جدول ۲ طرح اجرایی با ریسک کمینه را نشان می‌دهد. برای صرفه‌جویی در فضا تنها پیکربندی متناظر با تکرارهای ضریب ۶ به نمایش درآمده‌اند.



شکل ۸ ارتباط بین تابع هزینه و زمان تکمیل فرایند برای چهار مورد مطالعاتی هوافضایی

با توجه به پیکربندی‌ها در جدول ۲ می‌توان در مورد اجرای همزمان آنها به‌منظور فشرده‌سازی و کاهش زمان تکمیل تصمیم گرفت. در این بین، امکان موازی‌سازی زیربلوک‌ها به‌دلیل نبود بازخورد بین آنها وجود دارد. براین اساس خروجی‌های وظایف و زیربلوک‌ها در گام قبلی معیار قرار می‌گیرند. برای مثال در تکرار ۴۲ زیربلوک‌های سه‌گانه تشکیل شده امکان اجرای همزمان به‌شکل موازی را پیدا می‌کنند. هرچند تاکنون در مورد کیفیت طرح‌های اجرایی زمان اجرای آنها صحبت به میان آمد، لازم است به رابطهٔ بین روش پیشنهادی و برخی از مدل‌های موجود اشاره شود. مدل دنباله‌ای یک حالت خاص از روش پیشنهادی به‌شمار می‌آید که در آن تمامی وظایف به یکباره و در یک گام به‌هم می‌پیوندند. در این مدل تمامی بازخوردها از ابتدا امکان‌پذیرند. در مقابل مدل کاملاً موازی حالتی را نشان می‌دهد که هیچ‌کدام از وظایف تشکیل زیربلوک را نداده و با هم به‌شکل موازی انجام می‌پذیرند. با توجه به توضیحات داده‌شده می‌توان پیش‌بینی نمود که هیچ کدام از این دو مدل کارآمد نیستند. همین‌طور، راهبرد شکستن یک بلوک همگیر به دو یا چند زیربلوک [۲۴] را می‌توان متناظر با یک گام از گام‌های نزدیک به پایان در طرح اجرایی با ریسک کمینه دانست. جدول ۳ مقایسه‌ای بین طرح اجرایی با ریسک کمینه و برخی از معمول‌ترین مدل‌های فرایندی را از دید زمان تکمیل ارائه می‌کند.

جدول ۱. ده طرح اجرایی برتر برحسب تابع هزینه و زمان تکمیل متوسط برای آنها

پیکربندی	تابع هزینه	زمان تکمیل میانگین (روز)	گام‌های تکمیل
A	۱۰۵	۶۱۳	۲۲
B	۱۳۷	۶۷۶	۳۳
C	۱۱۵	۷۱۷	۲۵
D	۹۹	۴۱۴	۱۸
E	۱۰۲	۴۲۳	۲۲
F	۱۰۶	۶۶۱	۲۰
G	۱۲۰	۷۲۰	۴۳
H	۱۲۹	۶۸۶	۴۳
I	۹۶	۴۴۲	۲۷
J	۱۱۷	۵۶۲	۲۴

جدول ۲. طرح اجرایی با ریسک کمینه برای فرایند طراحی بالگرد ترابری ای. اچ. ۱۰۱

تکرار	پیکربندی
۶	[19] [7] [14] [15] [16] [18] [10] [17] [13] [6] [12] [3] [8] [1] [9] $\begin{bmatrix}11\\4\end{bmatrix}$ [2] [5] [19] [7] [14] [15] [16] $\begin{bmatrix}18\\10\end{bmatrix}$
۱۲	[17] [13] [6] [12] [3] [8] [1] [9] $\begin{bmatrix}11\\4\end{bmatrix}$ [2] [5] [19] [7] [14 15 16] [18
۱۸	⋯10 17]^T [13] [6] [12] [3] [8] [1] [9 11 4]^T [2] [5] [19] [7 14 15 16] [18
۲۴	⋯10 17 13]^T [6] [12] [3] [8] [1] [9 11 4 2]^T [5] [19 7 14 15 16 18
۳۰	⋯10 17 13]^T [6] [12] [3] [8] [1 9 11 4 2]^T [5] [19 7 14 15 16 18
۳۶	⋯10 17 13]^T [6] [12] [3] [8 1 9 11 4 2]^T [5] [19 7 14 15 16 18
۴۲	⋯10 17 13 6]^T [12] [3 8 1 9 11 4 2 5]^T [19 7 14 15 16 18
۴۸	⋯10 17 13 6 12 3 ⋯8 1 9 11 4 2 5]^T

جدول ۳. مقایسهٔ بین زمان تکمیل فرایند طراحی در مدل‌های دنباله‌ای، کاملاً موازی، و موازی شکسته با طرح اجرایی با ریسک کمینه

مدل	زمان تکمیل (روز)	درصد بهبود
دنباله‌ای	۸۱۲	۴۹
کاملاً موازی	۷۴۱	۴۴
موازی شکسته	۴۳۲	۴
طرح اجرایی با ریسک کمینه	۴۱۴	–

۶. نتیجه‌گیری

همان‌گونه که مشاهده شد، طرح اجرایی با ریسک کمینه در حالی که برخی از رایج‌ترین مدل‌های فرایندی را در محصولات پیچیده پوشش می‌دهد، قابل به رقابت چشم‌گیر با آنهاست. این روش که بر اساس الگوی رشد تدریجی استوار است از منظر کمینه‌سازی ریسک بازخورد، امکان کاهش زمان تکمیل پروژه را تا پایین‌ترین زمان ممکن فراهم می‌آورد. با وجود موفقیت نسبی روش پیشنهادی برخی از نقاط ضعف یا ابهام در آن قابل مشاهده است

که می‌توان با رفع آنها به بهبود طرح کمک نمود. این موارد به شرح زیرند. در این مقاله برای تخمین تعداد تکرارها از روش پیشنهادی در [۴] استفاده شد. در واقعیت این مقدار تخمینی رخ نمی‌دهد؛ زیرا فرایند می‌تواند با نرخ همگرایی تندتر یا کندتری پیش رود. در نتیجه در پایان تعداد تکرارهایی بیشتر یا کمتر از حد پیش‌بینی شده وجود خواهد داشت که به‌ترتیب می‌تواند به افزایش زمان تکمیل یا تلورانس ناکافی در طراحی بخش‌ها بینجامد. به‌عنوان مورد دیگر، در این مقاله برای سادگی بیشتر گام‌ها و تکرارها به‌شکل یکنواخت و با اولویت بخشی به گام‌های پایانی بر هم تطبیق داده شدند. این در حالی است که این تطبیق ممکن است به بهترین نتیجه نیانجامد. بحث در مورد نحوهٔ تخصیص تکرارها به گام‌های مؤثرتر نیازمند انجام پژوهشی جداگانه است. همین طور، در حالی‌که ضرایب ماتریس تبدیل کار برای شرایط استاندارد و در حضور تمامی عناصر تعریف شده‌اند، در قرنطینه‌سازی تعداد کمتری از وظایف ممکن است این ضرایب معرف دینامیک واقعی سامانه نباشند.

۷. مآخذ

[1] D. E. Whitney, Designing the design process, *Research in Engineering Design*, 1990, Vol. 2, No. 1, pp. 3–13.

[2] S. D. Eppinger, D. E. Whitney, R. P. Smith, D. A. Gebala, A model-based method for organizing tasks in product development, *Research in Engineering Design*, 1994, Vol. 6, No. 1, pp. 1–13.

[3] A. A. Yassine, K. R. Chelst, D. R. Falkenburg, A decision analytic framework for evaluating concurrent engineering, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1999, Vol. 46, No. 2, pp. 144–57.

[4] R. P. Smith, S. D. Eppinger, Identifying Controlling Features of Engineering Design Iteration, *Management Science*, 1997, Vol. 43, No. 3, pp. 276–93.

[5] W. Nasr, A. Yassine, O. Abou Kasm, An analytical approach to estimate the expected duration and variance for iterative product development projects, *Research in Engineering Design*, 2016, Vol. 27, No. 1, pp. 55–71.

[6] A. Y. Ha, E. L. Porteus, Optimal Timing of Reviews in Concurrent Design for Manufacturability, *Management Science*, 1995, Vol. 41, No. 9, pp. 1431–47.

[7] R. P. Smith, J. A. Morrow, Product development process modeling, *Design Studies*, 1999, Vol. 20, No. 3, pp. 237–61.

[8] T. R. Browning, Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2001, Vol. 48, No. 3, pp. 292–306.

[9] D. V. Steward, The design structure system: A method for managing the design of complex systems, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1981, Vol. 28, No. 3, pp. 71–4.

[10] T. R. Browning, Process integration using the design structure matrix, *Systems Engineering*, 2002, Vol. 5, No. 3, pp. 180–93.

[11] A. Kosari, M. H. Jafari, M. Fakoor, On Equivalency Between Numerical Process DSM and State-Space Representation, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2016, Vol. 63, No. 4, pp. 404–13.

[12] T. R. Browning, S. D. Eppinger, Modeling impacts of process architecture on cost and schedule risk in product development, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2002, Vol. 49, No. 4, pp. 428–42.

[13] D. Kim, On representations and dynamic analysis of concurrent engineering design, *Journal of Engineering Design*, 2007, Vol. 18, No. 3, pp. 265–77.

[14] K. L. Ong, S. G. Lee SG, L. P. Khoo, Homogeneous state-space representation of concurrent design, *Journal of Engineering Design*, 2003, Vol. 14, No. 2, pp. 221–45.

[15] C. D. McDaniel, A Linear Systems Framework for Analyzing the Automotive Appearance Design Process, Ms Thesis, Massachusetts, MIT, 1996.

[16] R. P. Smith, S. D. Eppinger, A Predictive Model of Sequential Iteration in Engineering Design, *Management Science*, 1997, Vol. 43, No. 8, pp. 1104–20.

[17] R. A. Ahmadi, R. H. Wang, *Rationalizing Product Development Processes*, UCLA: Anderson School of Management; 1994.

[18] R. P. Smith, S. D. Eppinger, Deciding between Sequential and Concurrent Tasks in Engineering Design, *Concurrent Engineering*, 1998, Vol. 6, No. 1, pp. 15–25.

[19] A. Yassine, An Introduction to Modeling and Analyzing Complex Product Development Processes Using the Design Structure Matrix (DSM) Method, *Management Science*, 2004, Vol. 51, No. 9, pp. 1-17.

[20] T. R. Browning, A. A. Yassine, Managing a Portfolio of Product Development Projects under Resource Constraints: Managing a Portfolio of Product Development Projects under Resource Constraints, *Decision Sciences*, 2016, Vol. 47, No. 2, pp. 333–72.

[21] S. H. Cho, S. D. Eppinger, A Simulation-Based Process Model for Managing Complex Design Projects, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2005, Vol. 52, No. 3, pp. 316–28.

[22] G. M. Hoedemaker, J. D. Blackburn, Van L. N. Wassenhove, Limits to Concurrency, *Decision Sciences*, 1999, Vol. 30, No. 1, pp. 1–18.

[23] F. Romli, M. Y. Harmin, Use of Monte Carlo method to estimate subsystem redesign risk for complex products: aircraft redesign case study. Renuganth Varatharajoo P, editor, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2015, Vol. 87, No. 6, pp. 563–70.

[24] B. Soltanmohammad, S. M. Malaek, A new method for design cycle period management in aircraft design process, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2008, Vol. 80, No. 5, pp. 497–509.

[25] R. Xiao, T. Chen, W. Chen, A new approach to solving coupled task sets based on resource balance strategy in product development, *International Journal of Materials and Product Technology*, 2010, Vol. 39, No. 3/4, p. 251.

[26] Y. Bassil, A Simulation Model for the Waterfall Software Development Life Cycle, 2012, http://arxiv.org/abs/1205.6904 (accessed Dec 31, 2018).

[27] F. AitSahlia, E. Johnson, P. Will, Is concurrent engineering always a sensible proposition? *IEEE Transactions on Engineering Management*, 199, Vol. 542, No. 2, pp. 166–70.

[28] J. F. Maier, D. C. Wynn, W. Biedermann, U. Lindemann, P. J. Clarkson, Simulating progressive iteration, rework and change propagation to prioritise design tasks, *Research in Engineering Design*, 2014, Vol. 25, No. 4, pp. 283–307.

[29] H. S. Yan, B. Wang, D. Xu, Z. Wang, Computing Completion Time and Optimal Scheduling of Design Activities in Concurrent Product Development Process, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 2010, Vol. 40, No. 1, pp. 76–89.

[30] Z. Wang, H. S. Yan, Optimizing the Concurrency for a Group of Design Activities, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2005, Vol. 52, No. 1, pp. 102–18.

[31] I. Cook, G. Coates, Optimising the time-based design structure matrix using a divide and hybridise algorithm, *Journal of Engineering Design*, 2016, Vol. 27, No. 4–6, pp. 306–32.

[32] X. Li, Y. Lei, W. Wang, W. Wang, Y. Zhu, A DSM-based multi-paradigm simulation modeling approach for complex systems, In IEEE 2013, pp. 1179–90.

[33] M. Haji Jafari, Improving Design Process of Aerospace Systems by Dynamic Modeling in State-Space, Phd Dissertation, Tehran, 2017.

[34] K. Ogata, *Modern control engineering*, 5th ed. Boston: Prentice-Hall, 2010, p. 894, Prentice-Hall electrical engineering series, Instrumentation and controls series.

[35] A. Royal Navy Merlin helicopter. http://www.deagel.com/ (accessed 12 Nov 2017).

[36] A. Chenarani, E. A. Druzhinin, D. N. Kritskiy, Simulating the Impact of Activity Uncertainties and Risk Combinations in R&D Projects, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2017, Vol. 10, No. 4, pp. 1-9.

پی‌نوشت

1. sequential
2. fully parallel
3. concurrent
4. coupling
5. execution plan
6. minimum risk execution plan (MiniREPS)
7. broken parallel
8. coupled blocks
9. decoupling
10. Massachusetts Institute of Technology (MIT)
11. work transformation matrix (WTM)
12. v-model
13. simulated annealing (SA)